

燃料電池(SOFC)用金属インターコネクタの開発

燃料電池は脱炭素化の実現に貢献する発電方法として注目されている。中でも固体酸化物形燃料電池 (SOFC: Solid Oxide Fuel Cell) は発電効率が高く、家庭用燃料電池コージェネレーションシステムに搭載されるなどして普及し始めている。SOFCの基幹部品の一つである金属インターコネクタについて紹介する。



SOFCを搭載した家庭用燃料電池コージェネレーションシステム
画像提供: 新エネルギー・産業技術総合開発機構

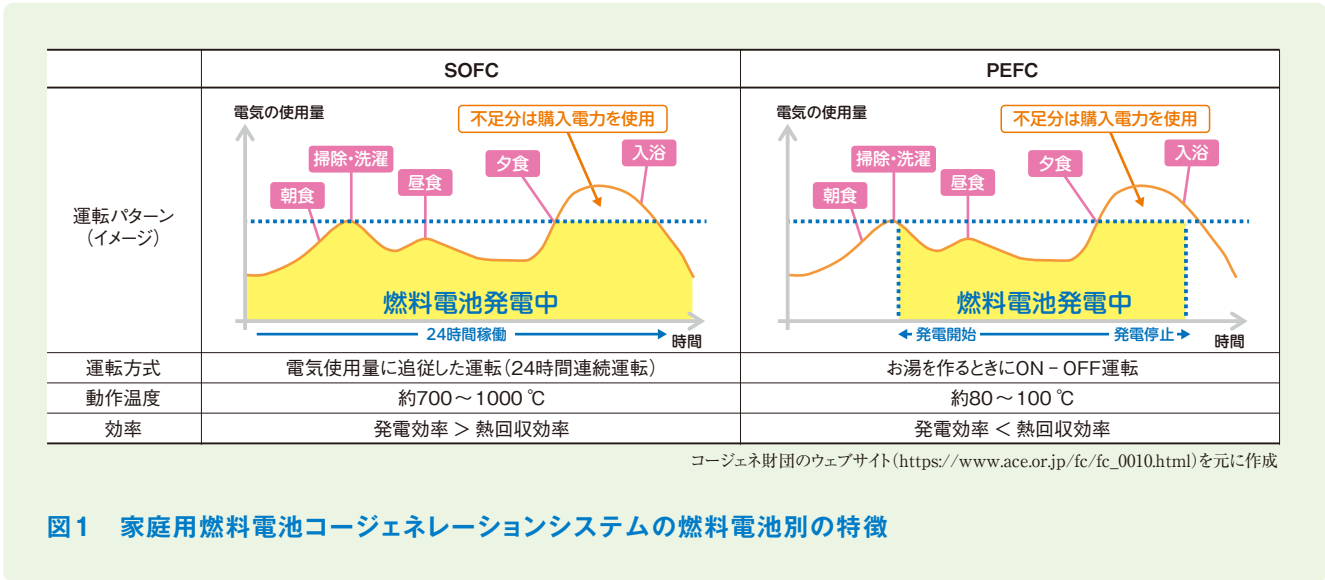


工場内に設置されたSOFCコージェネレーションシステム
画像提供: アサヒビール(株)

普及が期待されるSOFC

家庭用燃料電池コージェネレーションシステム「エネファーム」の累積普及台数が35万台を超えたことが2021年に発表された。エネファームは、2009年に家庭用の固体高分子形燃料電池 (PEFC: Polymer Electrolyte Fuel Cell) タイプが発売され、2011年には固体酸化物形燃料電池 (SOFC: Solid Oxide Fuel Cell) タイプが発売されている。

SOFCはPEFCと比較して高温で動作するために発電効率が高いことや、触媒として白金が不要などの特長を持つ一方で、高価な耐熱材料を使用する必要があるなどの課題があった。また、動作温度が高温のために、起動までに時間がかかり、連続運転を行う場合にはSOFCタイプ、昼食～夕食間はオン、入浴～翌日の掃除洗濯の間はオフにするなど頻繁なオンオフを伴う場合にはPEFCタイプといった使い分けが家庭用燃料電池コージェネレーションシステムでも推奨されている(図1)。





スタック

インター
コネクタ

スペーサー

セル

集電体

図2 SOFCスタックと部品構成

画像提供: マグネクス(株)

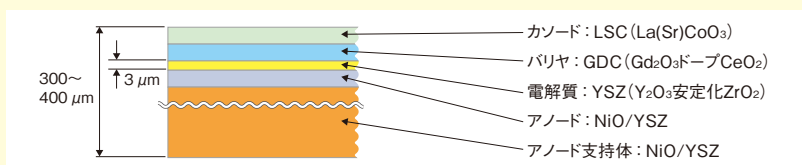


図3 セルの構成例

マグネクス(株)の資料を元に作成



ポーラスメタル



エキスパンドメタル



金属立体製織体

ポーラスメタルはニッケルなどの多孔体でアノード側に使用される。エキスパンドメタルは表面に微細加工を施した耐熱合金で鉄クロム系がカソード用、ニッケル系がアノード側に使用される。金属繊維を燃った金属立体製織体の集電材も開発されている。

画像提供: マグネクス(株)

図4 集電体材料の例

SOFCは、アノード、電解質、カソードが一体になったセルと呼ばれる部分と、集電体、スペーサー、シール材、インターコネクタなどから構成されている。これらの部品を積み重ねていくことでSOFCスタックを構成している(図2)。

SOFCの心臓部であるSOFCセルは層構造の酸化物膜で、例えばアノード支持型SOFCセルを供給しているElcogen社の製品では、電解質の厚さは $3\mu\text{m}$ 、セル全体でも $300\sim 400\mu\text{m}$ ほどになっている(図3)。電解質には Y_2O_3 安定化 ZrO_2 (YSZ: Yttria-Stabilized Zirconia)が使われることが多く、電解質層を薄くすることで動作温度の低下に寄与している。

セルの上下には発生した電流を集めるための集電体が設置されている。この集電体には高い導電性と空気や燃料ガスの流動性を妨げない性質が求められ、ニッケル多孔体などが用いられる(図4)。

また、単セルを直列に接続する部分では電気を通し、燃料ガスと空気を分離する役割を担う部材であるインターコネクタがある。PEFCの場合では同じ部材をセパレータと呼ぶことが多いが、本稿ではSOFCで多く使われている名称であるインターコネクタを使用する。

インターコネクタに用いられる金属材料

電極、電解質と並んで重要な燃料電池構成要素であるインターコネクタに使用される金属材料について説明する。動作温度が 1000°C 程度であった従来のSOFCではインターコネクタにはセラミックスが使用されていた。その後、低温で動作する電解質の開発が進み、2000年頃から $600\sim 800^\circ\text{C}$ で動作するSOFCが開発されてきた。

動作温度の低下とともにセラミックスに対して低コストで加工性に優れた金属材料をインターコネクタに採用する研究が行われた。2010年前後には各社がSOFCインターコネクタ用金属材料の発売を開始している。

SOFCインターコネクタ用金属材料には、高温での良好な導電性、高温での耐酸化性、電解質YSZに近い熱膨張率が求められ、主なSOFCインターコネクタ用金属材料はいずれもオーステナイト系よりも熱膨張が小さいフェライト系鉄クロム合金である。

また、高温での伝導性や耐酸化性を高めるために、さまざまな微量成分が添加されている。例えばSOFCインターコネクタ用として世界のSOFCメーカーや研究所に採用されてい

[質量%]					
Cr	Fe	C	N	Mn	Si
20.0~24.0	bal	<0.03	<0.03	0.3~0.8	0.1~0.6
Al	W	Nb	Ti	La	Cu
<0.1	1.0~3.0	0.2~1.0	0.02~0.20	0.04~0.20	<0.5

出所：馬場史雄：燃料電池、Vol.12（2013）No.4

図5 高クロム鋼 Crofer 22 Hの化学成分

るVDM社の高クロム鋼Crofer 22 Hでは、ニオブ、タングステン、シリコン、ランタン、マンガン、アルミニウムなどが添加されている(図5)。

インターコネクタ用金属材料は600～800℃の高温環境に曝されるため表面に酸化物が生成されるが、電極としての機能を発揮するためには酸化物の導電性が重要である。また、起動・停止に伴う熱サイクルで酸化被膜が剥離すると導電性を低下させる要因になる。このため、母材と緻密に密着する酸化膜を生成させることを目的としてランタンが添加されている。また、アルミニウムとチタンが酸化物層の成長を抑える働きをしている。マンガンは酸化膜の表面にマンガクロム層を形成し、この層は温度の上昇により抵抗が下がる半導体的挙動を示すため、導電性の向上に寄与している。このほかにもニオブとタングステンを加えることでクリープ強度を増加させている。

クロムを含むインターコネクタ用金属材料に求められるもう一つの機能として、クロムの蒸発防止対策を挙げることができる。これは蒸発したクロムが電極に付着することで電極

が被毒し、劣化することを防ぐためである。

高クロム鋼では、表面のマンガクロム酸化物層がクロムの蒸発を抑える働きがあるが、より強固にクロム蒸発を防止するためにコーティング処理を行っている場合もある。コーティング処理方法としてはニッケルコバルト電気めっきやマンガコバルト酸化物の溶射、コバルト蒸着などの方法が提案されている。そのほかにもフェライト系ステンレスにコバルトとセリウムを真空蒸着した材料も市販されている。

なお、インターコネクタはさまざまな形状に加工されるため、加工前にコーティングを施した場合には、加工面に母材の新生面が露出してしまふ。これに対してめっきは加工後にコーティングでき、原料の有効活用も可能なことから、量産化には適したコーティング手法として期待されている。

普及のカギとなるコスト削減と用途拡大

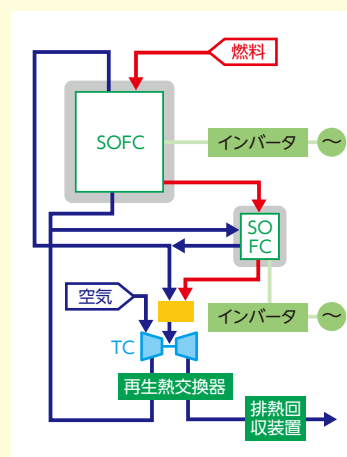
優れた特性を持つSOFCであるが、火力発電の約10倍といわれる導入コストの高さが普及の妨げになっている。SOFCで最も大きなコストを占めているセルでは、メーカーが自動生産設備を導入するなどにより低コスト化を目指している。また、前述の金属インターコネクタ材料では、真空溶解で生産していた従来製品が改良され、大気溶解で生産可能になっている。クリープ強度も向上していることから、インターコネクタの薄型化・軽量化によるコスト削減に寄与できる。

コスト削減に加えて、もう一つのSOFC普及のカギは用途の拡大である。従来の火力発電設備と比較して、スケールメリットの追求が難しいSOFCの場合、分散型電源としての活用が適しているといわれている。すでに幅3.2m、長さ11.4m、高さ3.3m、質量33tのSOFCを搭載した発電出力200kW級



画像提供：三菱重工業(株)

図6 SOFCとTCシステムの1MW級機



ターボチャージャー(TC)システムは、上段のSOFCモジュールで希釈された燃料を、後段に設置されたSOFCモジュールで発電するカスケードシステムを採用している。SOFC-TCシステムでは、効率の向上および部分負荷の効率向上が見込める。さらにタービン入口燃焼器の低温化が可能になることから水素はじめ燃料の多様化への適用拡大が容易になる。

画像提供：三菱重工業(株)

図7 SOFCとTCシステムのシステム構成図

のマイクロガスタービン (MGT) とのハイブリッド・コージェネレーションシステムが商用化されている。さらに、MGT をターボチャージャーに置き換えて運用性を高めた改良型の開発も進められている (図6、7)。

分散電源としてはほかにも、SOFC を固体酸化物形電解セル (SOEC: Solid Oxide Electrolysis Cell) として活用する方法も提案され、システム開発が進められている。SOFC で水素と酸素から水が生成されるが、SOEC ではこれとは逆に水蒸気から水素と酸素を生成する反応が進行する。太陽光発電などの再生可能エネルギーを電源として、昼間は SOEC として水素を製造し、夜間は SOFC として製造した水素で発電するといったことが可能になる。

また、多様な燃料に対応できる SOFC の特性を生かして、

地域の有機性廃棄物を資源として利用する試みも行われている (図8、9)。ほかにも、ノートパソコンなどの電源に用いる小型の SOFC の開発も進められていて、高出力化・軽量化した 10 cm ほどの SOFC を用いることで長時間の飛行を可能にしたドローンが開発されている (図10、11)。

さらに、より低温で動作する電解質の開発も進められている。現在、400℃ 付近で動作するプロトン伝導体を使用した SOFC の開発が報告されており、実用化すれば電気自動車の電源として SOFC が使用されるようになるかもしれない。

小型でも極めて高効率な SOFC は今後、広い範囲で適用されることで、脱炭素化や持続可能な社会の実現に大きく貢献していくと期待される。

●取材協力 マグネクス(株) ●文 石田亮一

ベトナムのメコンデルタのエビ養殖場内に、地域の有機性廃棄物を資源として利用した低炭素エビ養殖システムの実証実験が行われている (九州大学などの国際共同研究チームによる)。エビ養殖池へドロ、稲わら、ココナッツの搾りかすから製造したバイオマスガスを直接供給して作動する発電出力 1 kW の SOFC を開発し、発電効率 62.5% (直流発電端) を実現している。



画像提供: 九州大学

図8 有機性廃物を資源として利用した低炭素エビ養殖システムの実証プラント



画像提供: マグネクス(株)

図9 バイオマスガスから発電する SOFC

SOFC スタックの高出力化と軽量化によって、長時間飛行可能なドローンが開発されている ((株) アツミテックと産業技術総合研究所などの共同研究チームによる)。内部改質 SOFC により燃料に液化石油ガス (LPG) が利用でき、市販の LPG カセットボンベを使用できる。水素インフラが整備されていない地域でも、物流やインフラ点検、災害対応などに利用できる。



画像提供: 産業技術総合研究所

図10 SOFC を搭載したドローン (外観)



画像提供: (株) アツミテック

図11 ドローン搭載用 SOFC スタック